

振動曝露による末梢循環障害の評価における 2次元画像末梢循環モニタリングの有効性

Laser Doppler Imaging of Finger Skin Blood Flow
for Assessing Peripheral Vascular Impairment
in Workers Exposed to Hand-arm Vibration

富 田 耕太郎

Kotaro TOMIDA

はじめに

振動障害とは、林業や農業などでのチェーンソーや刈払い機、鉱業や建設業などでの削岩機、チッピングハンマーといった振動工具の取扱いに伴う手腕への職業的な振動曝露がもたらす末梢循環障害、末梢神経障害、筋・骨格系障害の総称である。近年、わが国における振動障害の発生件数は産業構造の変化、振動工具の改良、作業管理の導入等で著しく減少してきたものの、未だに多くの業務上疾病の新規認定があり、労働衛生上の重要な問題といえる。¹⁾

振動障害のうち、その代表的症状である末梢循環障害については、初期の臨床症状として手指の冷えやしびれが認められ、徐々にその範囲が拡大しながら症状の程度が強くなるとされている。^{2,3)}そして、症状がさらに進行すると、手指のある部分から末梢全体に至る境界明瞭な蒼白発作が出現するレイノー現象と呼ばれる症状を呈するようになる。レイノー現象の詳細な機序については未だ十分に解明されていないが、皮膚の細小動脈の発作性攣縮による閉塞のために皮膚静脈叢の血液が消失することによって生じると考えられている。^{4,6)}また、レイノー現象の発症は、全身および局所への寒冷曝露によって誘発される血管収縮・拡張反応の異常が転機となる。よって、その診断を補完するために行う検査は寒冷刺激に伴う手指の循環応答を観察する方法が適しており、冷水浸漬中やその後の回復過程における皮膚温や皮膚血流、手指動脈血圧、指尖容積脈波などの変化からその障害を捉える試みがなされている。⁷⁻⁹⁾しかし、従来の検査法で用いられている指標の多くは測定部位が単一指で、かつ定点に局限される方法から得られるため、通常、複数の指に異なる症度で出現するレイノー現象の障害の程度を十分に評価しきれないとの指摘もある。¹⁰⁾一方、近年開発されたレーザー血流画像化装置 (laser Doppler perfusion imager) は、皮膚表層の微小循環を画像として2次元的に描出できる装置であり、^{11,12)}遠隔部から照射されたレーザー光が皮膚の一定領域をスキャンすることで、組織に非接触・非侵襲で、広範囲の血流分布を捉えられるという特徴がある。^{13,14)}この装置

を冷水浸漬中の手指末梢循環のモニタリングに応用し、複数指に及ぶ血流画像を解析することにより、寒冷刺激に対して複雑な血管応答を呈するレイノー現象の病態像を的確に捉えられる可能性がある^{15,16)}。

そこで本研究では、振動障害患者や振動工具の取扱い者、または職業的に振動に曝露されていない者を対象に、レーザー血流画像化装置を用いた冷水浸漬試験中の手指末梢循環モニタリング検査を実施し、レイノー現象の有無および症度による比較検討を含めて、本検査法の有効性について検証するとともに、末梢循環障害の診断のための評価基準の設定を試みた。

対象と方法

1. 対象者

対象者は45～69歳（ 60.7 ± 5.1 歳）の男性で、現在、振動工具を使用する業務に従事している労働者44名、すでに振動障害の認定を受けて療養中の患者24名であった。また、職業的な振動曝露がなく、振動障害の類似疾患を認めない者37名を比較対照とした。

対象者には検査に先がけて、その目的や内容に関する文書と口頭による説明を行った後、署名により同意を得た。また、検査に際しては、医師の問診による体調確認や血圧測定を行い、検査時の安全確保には十分に配慮を行った。なお、本研究における調査は、和歌山県立医科大学・疫学研究倫理委員会の審査を受け、承認を得た後に実施した。

2. 冷水浸漬試験中の手指皮膚血流の測定

冷水浸漬試験は10℃ 10分法に準拠して行った。被験者は、冷水浸漬試験の開始前に、室温を 24 ± 1 ℃に安定させた室内において、座位にて少なくとも30分間の室温馴化を行った後、水温を10℃に保った冷水槽に手指を10分間浸漬し、終了後、再び10分間、浸漬前と同じ状態で安静を保った。冷水に浸漬する手指は症状が認められる、あるいは症状が強い側とし、症状が同程度または認められない場合は原則として利き手側とした。

手指皮膚血流の測定にはレーザー血流画像化装置（Perimed社製 Periscan PIM- II）を用いた。この装置による手指皮膚血流測定のブロックダイアグラムを図1に示した。まず、最大出力1 mW以下で波長670nmの半導体レーザーが、スキャナーヘッド内に取り付けられた照射方向調節鏡を介して皮膚表層の約数百 μm の深さまで照射される。スキャニングはステップワイズ方式とよばれる方法を採用し、レーザー光が測定ポイントごとに50msecの間隔で停止するようになっている。また、照射されたレーザー光は微小循環系の赤血球に衝突して散乱するが、これをその運動速度に比例したドップラー偏位波としてスキャナーヘッド内のPhoto detectorで検出する。さらに、その信号がCPUで処理された後にモニターに2次元的に描出されるようになっている^{11,12)}。従来型のレーザードップラー血流計ではレーザー光が組織内約1 mmのドーム状範囲の血流を捉えるのみであったが、この装置では最大約30cm×30cm

の領域までをスキャンニングすることができ、より高い再現性を得ることができる。また、プローベを装着する必要がないため、皮膚表面の肥厚や亀裂などといった測定部位の状態に影響されることも少ないと考えられる。

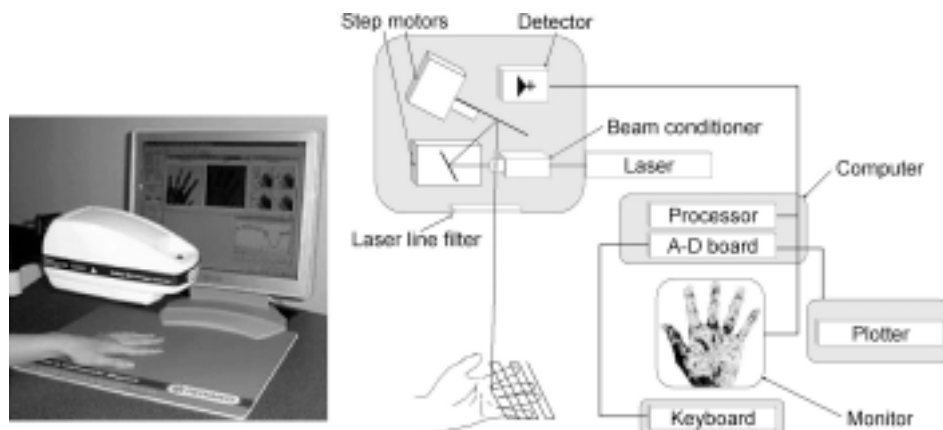


Fig. 1. The PIM-II laser Doppler Perfusion Imager and its block diagram for noninvasive imaging of superficial tissue perfusion.

手指の血流画像は、冷水浸漬試験における浸漬前5分、浸漬中10分、終了後の回復期10分の計25分間、2分間隔で連続的に撮像した（常温下3枚、浸漬中5枚、回復期5枚の計13枚）。撮像部位は示指から環指に及ぶ手掌側全体を含む 45×45 ポイント（約 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ ）の範囲とし、レーザー光はスキャナーヘッド部を測定部位から約15cmの距離で平行になるように固定したうえで、Resolution Lowモードで、撮像1回に約1分を要するスピード設定にてスキャンニングさせた^{10,17)}。測定開始前には、被験者の両手の掌側全体を約 35°C に設定した加温マット上で5分間保温した。加温処置の終了後は、椅座位にて再び安静状態を維持し、手指の皮膚温が安定してから測定を行った。さらに、各被験者の測定に際しては、事前に専用のキャリブレーション装置（LI710 CalBox NR）を用いて校正データを測定し、高流量域および低流量域における計測値がそれぞれ $1.5 \sim 1.6\text{V}$ 、 $0.4 \sim 0.5\text{V}$ の範囲になることを確認した。検査には、専用の負荷装置を使用し、冷水層をジャッキにて昇降させることで、手指を移動させずに固定した状態で冷水に浸漬し、その前後での測定が連続的に行えるようにした。冷水浸漬中は、レーザー光の水面での屈折を少なくするため、測定部位を水面から約5cmの位置に固定するように冷水槽の高さを調節した。さらに、検査室内の照明をできるだけ暗く保つとともに、レーザーヘッド部から測定部位にかけて黒い布で覆うことで、レーザー光への干渉をできるだけ避けるようにした。

冷水浸漬試験中に撮像した手指の血流画像について、専用の画像解析ソフト LDPI Win. ver. 2.6を用い、示指、中指、環指の末節部領域を解析部位としてその範囲における平均血流量 (V) を算出した。また、個人の測定結果を評価するにあたって、冷水浸漬試験の浸漬前、浸漬中、浸漬後の回復期の各相について皮膚血流の代表値を算出した。すなわち、浸漬前は1・3・5分の3点の中央値、浸漬中は5・7・9分の3点の平均値、回復期は1・3・5・7・9分の5点の平均値とした。さらに、終了後の皮膚血流の回復の程度を端的に示す指標として、回復比（{回復期の5点の平均値} / {浸漬中の5点の最低値}）^{10,17)} を求めた。

3. 振動工具の使用歴、振動障害に係る手指の症状

振動工具の取扱いき者および療養患者については、工具の種類とその使用年数、振動障害に関わる手指の症状を聞き取りによって調査した。レイノー現象の同定は医師が問診時において発症部位、頻度、発症機転などを聴取するとともに、典型的なレイノー現象発症時の写真を供覧して確認した。さらに、手指の末梢循環および末梢神経障害について、ストックホルムワークショップスケール^{18,19)}を用いて症度分類を行った。

4. 統計解析

対象者のうち、投薬および他疾患、または外傷などによる検査値への影響を考慮すべき者3名と、検査開始前の少なくとも1時間以内に喫煙またはカフェインを含む飲料水を摂取した者2名、測定不良のため撮像した血流画像からの解析が困難であった者1名を除外した100名を分析対象とした。統計解析にはSPSS15.0J for Windowsを使用した。3群以上での変数の比較にはKruskal Wallis検定を用いた。また、多重比較はMann-WhitneyのU検定の後、Bonferroniの不等式による修正を行った。統計学的有意水準は5%とした。

結 果

1. 対象者の属性

振動工具の取扱いき者における職種は林業、建設業、製造業などで、工具の使用年数は11～43年の範囲にあり、平均は27.3年であった。使用する工具は、チェーンソー、削岩機、刈払い機、インパクトレンチ、グラインダー、ハンマー、ドリル、カッターなどであった。療養患者における治療期間は6か月～8年の範囲にあり、平均は3.8年であった。また、対照群における職種は現業作業員、事務職員、農業従事者、医療従事者などであった。

振動工具の取扱いき者および療養患者のなかで、手指にレイノー現象を認める者は29名、認めない者は37名であり、それぞれレイノー群と曝露群とした。レイノー群、曝露群、対照群における身体特性および工具の使用状況を比較して表1に示した。年齢は各群ともに60歳前後であり、群間に差は認められなかった。血圧では収縮期、拡張期ともにレイノー群>曝

露群＞対照群の順に高値を示し、レイノー群では対照群に比べて有意な差が認められた。また、工具の使用年数と1日の使用時間はレイノー群が曝露群よりも有意に高くなっていた。さらに、レイノー群について、ストックホルムワークショップスケールによって末梢循環障害の症度分類を行うと、症度1（軽度）に該当する者は9名、症度2（中等度）は11名、症度3（高度）は9名であった。また、レイノー群と曝露群のうち、しびれや触覚異常、知覚鈍麻などの末梢神経障害の症状を訴える者は42名であり、ストックホルムワークショップスケールの症度1に該当する者は18名、症度2は10名、症度3は14名であった。

Table 1. Physiological and demographic characteristics and outline of disorders in study subjects

Variables	VWF (n=29)	Exposed (n=37)	Controls (n=34)
Age, years	61.2 (4.8)	60.4 (4.5)	59.5 (5.4)
Body height, cm	164.4 (7.1)	163.0 (7.3)	166.0 (6.4)
Body weight, kg	62.3 (8.0)*	61.2 (8.1)*	65.0 (9.3)
Systolic blood pressure, mmHg	146.8 (14.3)**	140.1 (16.5)	137.7 (15.8)
Diastolic blood pressure, mmHg	87.6 (11.1)*	82.3 (13.1)	80.9 (13.6)
Vibration exposure, year	32.7 (9.4)†	24.1 (12.7)	---
Daily exposure, hour/day	5.7 (0.5)†	4.6 (0.8)	---
Current smoker, n (%)	15 (51.7)	20 (54.1)	16 (47.1)

Stage of VWF ^a , stage [n]			
VWF: IV[9], 2V[11], 3V[9]			
Stage of sensory reduction ^a , stage [n]			
VWF: 1SN[7], 2SN[8], 3SN[14] Exposed: 0SN[21], 1SN[11], 2SN[2]			

^aStaging was based on Stockholm Workshop Scale.

Values are shown as mean (SD). *p<0.05, **p<0.01 vs. Controls, †p<0.05 vs. Exposed.

Statistical significance was tested by Wilcoxon rank sum test with Bonferroni correction.

2. 冷水浸漬試験中の手指皮膚血流の変化

冷水浸漬試験中の手指末節部領域の皮膚血流をレイノー群、曝露群、対照群で比較して図2に示した。冷水浸漬の常温下では、示指、中指、環指のいずれにおいてもレイノー群が低値となり、曝露群や対照群との間に有意な差が認められた。また、レイノー群では冷水への浸漬直後に著しく皮膚血流が減少した後、一貫して低値を維持していた。さらに、浸漬終了後の回復期においては、浸漬前や浸漬中よりも各群の差が明確に認められ、レイノー群では血流の回復が著しく遅延し、すべての測定点で曝露群や対照群に比べて有意に低値となった。

冷水浸漬試験中の浸漬前、浸漬中、浸漬終了後の各相での皮膚血流の代表値を群間で比較したところ（図3）、レイノー群の皮膚血流はすべての相において曝露群や対照群よりも有意

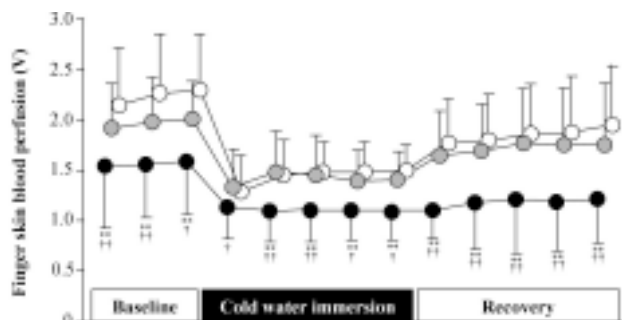
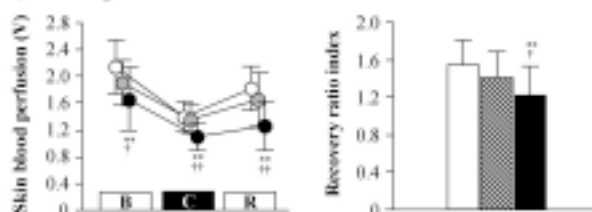


Fig. 2. Changes in the blood perfusion of the distal phalanx area of the middle finger in study subjects before, during, and after the cold water immersion test.

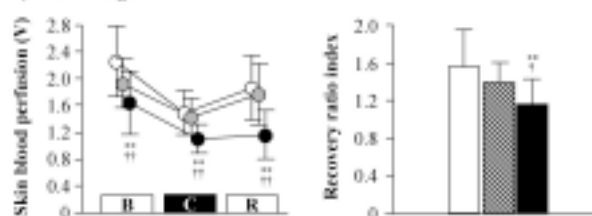
● VWF (n=29), ● Exposed (n=37), ○ Controls (n=34)

Values are shown as mean (SD). **p<0.01 vs. Controls. *p<0.05, †p<0.01 vs. Exposed. Statistical significance was tested by Wilcoxon rank sum test with Bonferroni correction.

a) Index finger



b) Middle finger



c) Ring finger

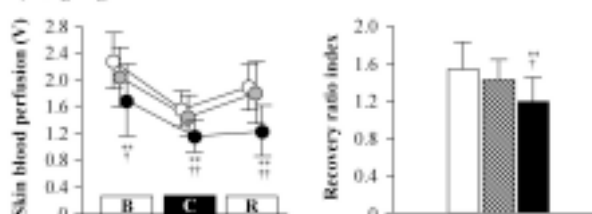


Fig. 3. Comparisons of blood perfusion summary values and recovery ratio index in study subjects.

● VWF (n=29), ● Exposed (n=37), ○ Controls (n=34)

Values are shown as mean (SD). **p<0.01 vs. Controls. *p<0.05, †p<0.01 vs. Exposed. Statistical significance was tested by Wilcoxon rank sum test with Bonferroni correction.

に低値を示した。特に、浸漬中と浸漬終了後ではレイノー群が他の群よりも明らかに低値となった。また、冷水浸漬後の回復過程の指標の回復比についても、レイノー群<曝露群<対照群の順に低値を示す傾向にあった。続いて、ストックホルムワークショップスケールによる末梢循環障害の症度別に各指の皮膚血流を比較したところ（図4）、浸漬前の値では明らかなではなかったが、浸漬中と浸漬終了後、さらに回復比では症度が進行するにつれて連続的に低値となる傾向が認められた。

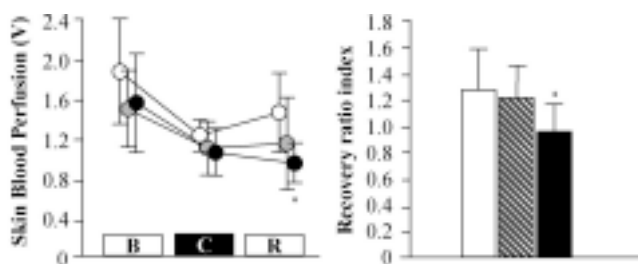


Fig. 4. Comparisons of blood perfusion summary values and recovery ratio index in VWF subjects by the Stockholm workshop scale for vascular disorders.

○□ Stage 1 (n=9), ◐◑ Stage 2 (n=11), ●■ Stage 3 (n=9)

Values are shown as mean (SD) of blood perfusion of the middle finger.

* $p < 0.05$ vs. VWF subjects with vascular disorder of Stage 1.

Statistical significance was tested by Wilcoxon rank sum test with Bonferroni correction.

3. 検査結果の評価と所見レベルの判定

検査結果から個人の所見レベルの判定を行うために、示指、中指、環指それぞれについての冷水浸漬前、浸漬中、浸漬後の皮膚血流の代表値とその回復比を評価指標として用いた。また、各指標の基準値を設定するために、対照群における「平均値－1.96標準偏差」の値を求めた結果、浸漬前：1.5V、浸漬中：1.0V、回復期：1.2V、回復比：1.0となり、個人の検査値が基準値未満である場合を「異常値」、それ以上である場合を「正常値」と定義した。各群における評価指標ごとの異常値の保有者数を表2に示した。レイノー群では浸漬前、浸漬中、浸漬後の代表値および回復比のいずれにおいても異常値を認める者が多く、とくに浸漬後の回復期において出現頻度が高い傾向にあった。また、評価指標のいずれかで少なくとも1つ以上の異常値を認める者は、レイノー群では23名であり、曝露群の8名、対象群の4名に比べて著しく多くなっていた。本検査の判定結果として、異常値がある場合に「検査陽性」、無い場合に「検査陰性」と判断すると、レイノー現象の有無を判別したときのレイノー群における検査の感度は79.3%、曝露群と対照群における検査の特異度はそれぞれ78.4%、88.2%となった。

さらに、個人において示指、中指、環指のすべてについて基準値との比較を行い、異常値

となる個数の合計を求めた（最小0個から最大12個：3指×4評価指標）。その上で、個人の所見レベルとして、異常値の個数が3個未満を「クラス0」、3個以上6個未満を「クラス1」、6個以上9個未満を「クラス2」、9個以上を「クラス3」とする評価基準を設定した。レイノー群、曝露群、対照群における所見レベル別の分布を表3に示した。レイノー群では「クラス0」から「クラス3」まで概ね均等に分布しており、「クラス2」が最も多かった。一方、曝露群と対照群では大部分が「クラス0」に分類され、「クラス1」と「クラス2」に該当する者が数例みられた。この所見レベルにおいて、「クラス0」の場合を「検査陰性」、「クラス1」以上の場合を「検査陽性」と判断すると、レイノー群での検査の敏感度は72.4%、曝露群と対照群での検査の特異度は83.8%、91.2%となった。

Table 2. Accuracy of blood perfusion variables for the diagnosis of vibration-induced white finger

	Blood perfusion summary value (V)				Recovery ratio index (<1.0) ^a			Result of the LDPI ^d test		
	Baseline (<1.5) ^a	Cooling (<1.0) ^a	Recovery (<1.2) ^a							
	n ^b (%)	n ^b (%)	n ^b (%)	n ^b (%)				n ^c	Sn ^d	Sp ^d
VWF (n=29)	12 (41.4)	14 (48.3)	21 (72.4)	17 (58.6)	23	79.3%	----	23	79.3%	----
Exposed (n=37)	7 (18.9)	5 (13.5)	3 (8.1)	3 (8.1)	8	----	78.4%	8	----	78.4%
Controls (n=34)	3 (8.8)	0 (0.0)	1 (2.9)	1 (2.9)	4	----	88.2%	4	----	88.2%

^a Cut-off values for the laser Doppler blood perfusion variables were defined as <1.96SD away from the mean values in the Controls.

^b Positive when any of the index, middle, and ring fingers showed values below the cut-off values.

^c Positive when subject had the hand with finger(s) showing more than one abnormal result for any of the four laser Doppler blood perfusion variables.

^d LDPI, laser Doppler perfusion imaging; Sn, sensitivity; Sp, specificity

Table 3. Distribution of subjects in each class based on the results of blood perfusion test

	Class-0 (0-2) ^a	Class-1 (3-5) ^a	Class-2 (6-8) ^a	Class-3 (9-12) ^a	Result of the LDPI ^c test		
	n (%)	n (%)	n (%)	n (%)	n ^b	Sn ^c	Sp ^c
VWF (n=29)	8 (27.6)	7 (24.1)	9 (72.4)	5 (31.0)	21	72.4%	----
Exposed (n=37)	31 (83.8)	4 (10.8)	2 (5.4)	0 (0.0)	8	----	83.8%
Controls (n=34)	31 (91.2)	2 (5.9)	1 (2.9)	0 (0.0)	4	----	91.2%

^a The classes of vascular disorder are determined according to the sum of abnormal result in the index, middle, and ring fingers for the four laser Doppler blood perfusion variables.

^b Number of subject who are classified in the level more than the class-1.

^c LDPI, laser Doppler perfusion imaging; Sn, sensitivity; Sp, specificity

考 察

本研究では、振動工具の取扱い者や振動障害の療養患者、または職業的に振動に曝露されていない者を対象として、冷水浸漬試験中の2次元末梢循環モニタリング検査を実施し、その有効性を検証するとともに、振動曝露による末梢循環障害の診断のための評価基準の設定を試みた。その結果、手指にレイノー現象を認める者では、冷水浸漬中に一貫して皮膚血流が低いレベルを推移し、浸漬終了後には血流の回復が著しく遅延する傾向が認められた。さらに、検査結果から判定された末梢循環障害の所見レベルは臨床所見からみたレイノー現象の症度と比較的強い相関を示したことから、本検査法が振動障害における末梢循環障害の客観的検査法として十分に妥当性があることが確認された。

振動障害における末梢循環障害の病態は複雑な様相を呈しており、振動曝露によるアドレナリンレセプターへの障害、^{4,21)}血管内皮細胞への障害、²²⁾血管周囲の神経終末への障害による²³⁾血管運動調節障害が指の虚血発作であるレイノー現象などの末梢循環機能異常をもたらしていると考えられている。本研究において、レイノー群で皮膚血流が著しく低値を示した理由としては、長期にわたる高頻度の振動工具使用がそのような末梢循環機能の器質的および機能的変化をもたらし、寒冷刺激に対する血管収縮能や拡張能を減弱させたことが挙げられる。すなわち、寒冷刺激によって血管が過度に収縮して血流が著しく減少するとともに、寒冷刺激後においても血管拡張機能がうまく作用せず血管収縮が持続しやすく、血流の回復が遅延しているものと考えられる。

本研究において、冷水浸漬試験中の皮膚血流は皮膚温とは様相の異なる特徴的な変化を示した。また、レイノー群と他の群との間にみられた皮膚血流の応答の差異は皮膚温において観察されるものよりも明確であった。レイノー現象の有症者で冷水浸漬中の皮膚温が低値を示したり、浸漬終了後の回復が遅延したりすることはよく知られており、末梢循環障害のスクリーニング検査として皮膚温測定が有効であることは明らかである。^{7,24)}しかしながら、冷水浸漬中の皮膚血流と皮膚温の反応はともに末梢循環機能を反映してはいるものの、皮膚血流は寒冷刺激に対してより鋭敏な反応を示し、それによって皮膚温のみでは捉えにくい手指の微細な循環障害を検出する可能性がある。また、そのような鋭敏な皮膚血流の変化は、従来の一点型のレーザー血流計では十分に検出できなかったが、レーザー血流画像化装置を用い、2次元的な画像イメージとして詳細に観察することで客観的に評価しえたものと考えられる。さらに、皮膚温測定は、主として冷水浸漬後の皮膚温の回復過程において末梢循環機能の差異が認められる検査であるのに対して、²⁴⁾レーザー血流画像化装置による皮膚血流測定では、浸漬後の回復期の様相を捉えるのみならず、冷水浸漬中の手指の末梢血管応答をも十分に評価しうることを示唆された。

我々は、これまでからレーザー血流画像化装置を冷水浸漬試験における手指皮膚血流のモニタリングに応用した検査法の開発を試みてきた。その中で、検査に係る被検者の測定肢位

や水の物理的介在、検査室内の環境温度などの様々な条件が検査の精度に及ぼす影響、さらには最適な血流画像の撮像方法などについての検討を行ってきており、本研究では、これらの基礎的検討に基づいて確立されたプロトコルで検査を実施した。すなわち、冷水浸漬試験は、室温を24～25℃に安定させた静寂な検査室にて、専用の負荷装置を用いて10℃10分法に準拠して行った。皮膚血流は、浸漬前の5分、浸漬中10分、浸漬後の回復期10分の計25分間、示指、中指、環指に及ぶ手掌側全体の範囲にて2分間隔で測定した。^{10,17)} 前述したように、レイノー群では冷水浸漬中に一貫して皮膚血流が低いレベルを推移し、浸漬終了後には血流の回復が著しく遅延する傾向がある。よって、末梢循環障害の所見レベルを判定するにあたっては、レイノー群にみられる冷水浸漬中と回復期での特徴的な変化のパターンを総合的に評価するのが適切である。そこで、示指、中指、環指を含む複数指における、冷水浸漬試験中のすべての相、すなわち、浸漬前、浸漬中、回復期からの情報を総合的に評価に反映させた指標を構築し、個人の所見レベルを判定するための評価基準を設定した。本研究において、この評価基準に従って個々の検査値を判定したときのレイノー現象の有無の判別に対する検査の敏感度、特異度を検討した結果、レイノー群での敏感度が79.3%、曝露群と対照群での特異度がそれぞれ78.4%、88.2%となった。さらに、個人における異常値の合計数（0～12個）によって所見レベルを「クラス0」から「クラス3」まで分類する基準も設定した。その結果、曝露群や対照群ではほとんどが「クラス0」に該当したのに対して、レイノー群では「クラス0」から「クラス3」まで概ね均等に分布していた。また、「クラス0」を所見なしと判断したときのレイノー群での敏感度は72.4%、曝露群と対照群の特異度は83.8%、91.2%となり、これまでに報告されている種々の末梢循環機能検査と比較しても遜色ない検査精度が得られた。²⁵⁾ よって、今回設定した評価基準は、振動曝露による末梢循環障害を診断するうえで有用であることが示唆された。

しかしながら、曝露群や対照群のなかにも冷水浸漬試験中に皮膚血流が低値を示し、その判定結果が「クラス1」または「クラス2」となる者も数例みられた。このような臨床所見と検査結果とのズレについては、皮膚温検査などの他の検査法でも同様に認められることである。例えば、振動工具を長期間使用しても症状が全くみられない場合や、低振動の工具を短期間使用していても症状を強く訴える場合があるように、振動曝露に対する個人の感受性の違いにも影響されるものと考えられ、どのような検査にも一定の頻度で生じてくる可能性があり、本検査法も例外ではないといえる。したがって、本検査法は振動障害における末梢循環機能検査としてある程度の妥当性を有するといえるが、末梢循環障害の病態像は複雑であり、それらを十分に捉えることは困難であるため、他の検査法と組み合わせて総合的に評価を行うことで、診断精度がさらに向上してくるものと考えられる。

また、撮像した画像イメージをもとに、指の節ごとの血流分布を比較してみると、対照群や曝露群においては、基節から末節部までの指全体のなかで、特に末節部の血流が多いとい

う特徴が一貫してみられるのに対して、レイノー群の場合には、このような血流勾配が比較的小さく、冷水浸漬中とその後の回復期では、とりわけその傾向が顕著に認められた。一般に、手指の末節部分は振動工具の把持による振動曝露や寒冷刺激などの影響を受けやすく、また、振動障害におけるレイノー現象の大部分は末節部から出現するとされていることから、レイノー群ではこのような特徴的な血流分布のパターンを示すものと推察される。また、振動工具の取扱いに伴うレイノー現象は、手指の広い範囲に異なる症度で出現することが多い。⁴⁾したがって、個人の所見レベルを判定するにあたっては、単に各指の末節部領域における平均血流量の測定値を指標とするだけでなく、広い範囲の血流分布のパターンについての付加的情報も加味することで、振動曝露に起因する末梢循環障害を的確に捉えられる可能性が期待できるものと考えられた。

以上のように、冷水浸漬試験中の2次元画像末梢循環モニタリング検査を施行した結果、振動工具の取扱い者や振動障害の療養患者のうち、手指にレイノー現象を認める者では、冷水浸漬中に一貫して皮膚血流が低いレベルを推移し、浸漬終了後には血流の回復が著しく遅延する特徴的な変化のパターンがみられた。さらには、検査結果から判定された所見レベルは、臨床所見からみた症度レベルとよく相関するとともに、レイノー現象の判別に対して比較的高い精度を示しており、本検査法の診断的有効性とレイノー現象の診断に対する評価基準の妥当性が示唆された。

文献

- 1) 厚生労働省労働基準局労災補償部補償課編：業務上疾病の労災補償状況調査結果，厚生労働省，東京，2004.
- 2) Pyykko I: Clinical aspects of the hand-arm vibration syndrome. A review. Scand J Work Environ Health 12 (5) : 439-47, 1986.
- 3) Chetter C, Kent PJ, Kester RC: The hand arm vibration syndrome: a review. Cardiovasc Surg 6 (1) : 1-9, 2003.
- 4) Lindblad LE, Ekenvall L: Alpha 2 -adrenoceptor inhibition in patients with vibration white fingers. Kurume Med J. 37 Suppl: S95-9, 1990.
- 5) Taccola A, Aprile C, Bacchella L: Occupational syndromes of the extremities. The role of endothelin in the cold-test vasospasm: a pathogenetic hypothesis. G Ital Med Lav. 13 (1-6) : 71-5, 1991.
- 6) Stoyneva Z, Lyapina M, Tzvetkov D, Vodenicharov E.: Current pathophysiological views on vibration-induced Raynaud's phenomenon. Cardiovasc Res. 57 (3) : 615-24, 2003.
- 7) Pelmear PL: The clinical assessment of hand-arm vibration syndrome. Occup Med 53 (5) : 337-41, 2003.
- 8) Öberg PÅ, Tenland T, Nilsson GE: Laser-Doppler flowmetry - a non-invasive and continuous method for blood flow evaluation in microvascular studies. Acta Med Scand Suppl 687: 17-24, 1984.
- 9) 白石匡史, 長濱吉幸, 岡田明彦: 振動障害における末梢循環障害の加速度脈波計を用いた検討, 日本職業・災害医学会会誌, 48 (5) : 427-30, 2000.
- 10) 振動障害の検査指針検討会: 振動障害の検査指針検討会報告書, 平成18年3月.

- 11) Wårdell K, Jakobsson A, Nilsson GE: Laser Doppler perfusion imaging by dynamic lightscattering, IEEE Trans. Biomed. Eng 40: 309-16, 1993.
- 12) Wardell K, Braverman IM, Silverman DG, Nilsson GE: Spatial heterogeneity in normal skin perfusion recorded with laser Doppler imaging and flowmetry. Microvasc Res 48 (1) : 26-38, 1994.
- 13) Saravanamuthu J, Seifalian AM, Reid WM, Maclean AB: A new technique to map vulva microcirculation using laser Doppler perfusion imager. Int J Gynecol Cancer 13 (6) : 812-8, 2003.
- 14) Fullerton A, Rode B, Serup J: Studies of cutaneous blood flow of normal forearm skin and irritated forearm skin based on high-resolution laser Doppler perfusion imaging (HR-LDPI) . Skin Res Technol 8 (1) : 32-40, 2002.
- 15) Picart C, Carpentier PH, Brasseur S, Galliard H, Piau JM: Systemic sclerosis: blood rheometry and laser Doppler imaging of digital cutaneous microcirculation during local cold exposure. Clin Hemorheol Microcirc 18 (1) : 47-58, 1998.
- 16) Miyai N, Terada K, Sakaguchi S, Minami Y, Tomura T, Yamamoto H, Tomida K, Miyashita K: Preliminary study on the assessment of peripheral vascular response to cold provocation in workers exposed to hand-arm vibration using laser Doppler perfusion imager. Ind Health 43 (3) : 548-55, 2005.
- 17) Terada K, Miyai N, Maejima Y, Sakaguchi S, Tomura T, Yoshimasu K, Morioka I, Miyashita K: Laser Doppler imaging of skin blood flow for assessing peripheral vascular impairment in hand-arm vibration syndrome. Ind Health 45 (2) : 309-17, 2007.
- 18) Gemne G, Pyykko I, Taylor W, Pelmear PL: The Stockholm Workshop scale for the classification of cold-induced Raynaud's phenomenon in the hand-arm vibration syndrome (revision of the Taylor-Pelmear scale) . Scand J Work Environ Health 13 (4) , 275-8, 1987.
- 19) Brammer AJ, Taylor W, Lundborg G: Sensorineural stages of the hand-arm vibration syndrome. Scand J Work Environ Health 13: 279-83, 1987.
- 20) 富田耕太郎, 宮下和久, 宮井信行, 山本博一, 有田幹雄, 森岡郁晴, 坂口俊二: レーザー血流画像化装置による新しい末梢循環動態観察法に関する基礎および応用的研究. 平成15年度～平成16年度科学研究費補助金基盤研究 (C) (1) 研究結果報告書, 平成17年3月.
- 21) Ekenvall L, Lindblad LE: Is vibration white finger a primary sympathetic nerve injury? Br J Ind Med. 43: 702-6. 1986.
- 22) Harrison DG: Endothelial dysfunction in atherosclerosis. Basic Res Cardiol. 89 Suppl 1 : 87-102, 1994.
- 23) Goldsmith PC, Molina FA, Bunker CB, Terenghi G, Leslie TA, Fowler CJ, Polak JM, Dowd PM: Cutaneous nerve fibre depletion in vibration white finger. J R Soc Med. 87 (7) : 377-81, 1994.
- 24) Virokannas H, Rintamäki H: Finger blood pressure and rewarming rate for screening and diagnosis of Raynaud's phenomenon in workers exposed to vibration. Br J Ind Med 48 (7) : 480-4, 1991.
- 25) Olsen N: Diagnostic aspects of vibration-induced white finger. Int Arch Occup Environ Health. 75: 6 -13, 2002.